

# 微机电系统多场耦合仿真分析

高行山<sup>1,2</sup> 赵亚溥<sup>2</sup> 吕胜利<sup>1</sup> 邓子辰<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学工程力学系, 西安 710072)

(2. 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100080)

**摘要** 在微电子机械系统(MEMS)研究和设计中,微系统数值仿真分析是一个重要研究领域. 本文对 MEMS 中多种能量场耦合问题的各种数值仿真分析方法进行了综合评述. 分析了该领域目前的研究现状并指出了其今后的发展方向.

**关键词** 微电子机械系统, 能量场耦合, 计算机辅助设计

## 引言

近年来, 微电子技术、计算机技术、新材料和生物医学工程的迅猛发展, 极大地推动了微机电系统的发展. MEMS 是由特征尺寸在亚微米至毫米范围内的电子和机械元件组成的微器件或微系统, 它将传感、处理与执行融为一体, 以提供一种或多种特定功能.

目前, MEMS 的研究正在从基础研究阶段逐步跨入研制开发与实用阶段, 但与此相对应的设计方法却没有同步的发展起来. 长期以来, MEMS 的设计者不得不通过直接制造原型的方法来验证设计. 这种制造过程无疑浪费了大量的研制时间和经费, 因而不仅提高了研制成本, 而且加大了研制周期. 因此, 现在迫切需要建立一套微观尺度下的设计方法来为 MEMS 的设计提供指导. 通过 MEMS 的建模与仿真研究, 可以对从设计到制造的每个环节进行比较和验证, 从而优化 MEMS 器件的设计, 检验制造工艺的有效性, 将 MEMS 产品的最终形态及功能立体地、多侧面地由计算机模拟、分析、展现出来, 做到尚未真正加工出 MEMS 产品就对最终结果心中有数<sup>[1~6]</sup>.

## 1 MEMS 建模

MEMS 技术的首要问题和难题是精确、稳定、迅速的控制微机械构件的变形和运动规律, 掌握其在微尺度下的尺度效应和表面效应, 这是实现设计

功能的关键.

MEMS 结构器件, 如微传感器和微执行器的设计中, 模拟仿真程序已成为一种基本工具. 微机电系统计算机辅助设计 MEMSCAD 以有限元分析方法为主, 结合其它传统工程中的 CAD 技术而组成, 在设计中对微电子机械元件进行有效的分析和仿真. MEMS 其功能的实现, 如微传感和微致动, 都是通过热、电、磁、机械运动和变形等物理性质之间的转换来完成的. 在这一过程中必然发生多种物理性质之间的相互耦合. 对于较弱的耦合, 在不影响问题许可精度的前提下, 可忽略其耦合效应; 但是对于较强的耦合, 则必须考虑其耦合效应. 这样一来, 物质的状态空间必须由更多的参数才能确定. 除变形外, 还可能有电位移、磁场强度以及温度等, 而且它们在状态空间中所处的“地位”完全和变形一样, 这就使得我们必须结合力学、电磁学和热学等多个物理领域的知识来描述物质的变形和动力学特点.

目前商品化的有限元软件包一般只能求解单独的一种能量场问题(如包含变形、应力和动力学特性的力能量场问题、电磁场问题或流场问题)和一些简单的两种能量场耦合问题(如热-力效应问题和压电效应问题). 对于更多能量场耦合问题, 就无能为力了. 另外, 由于大多数 MEMS 器件几何结构复杂, 再加上多个能量场强耦合, 其行为必然表现为强非线性, 这也给系统建模和设计算法增加了不少难度. 因此耦合能量场仿真问题已成为 MEMSCAD 中的关键技术, 也吸引了越来越多的研究者把注意力放

2004-01-11 收到第一稿.

• 中科院力学研究所 LNM 资助项目(2003002).

到这方面来<sup>[7~10]</sup>。

目前国际上用于 MEMS 计算机辅助设计的商用软件包主要有<sup>[2]</sup>: Coventor 开发研制的 CoventorWare, CoventorWare 是目前世界上功能最强、规模最大的 MEMS 专用软件。拥有几十个专业模块,功能包含 MEMS 器件/系统的设计、工艺和仿真。IntelliSense 开发研制的 IntelliCAD,主要进行机-电-热的分析,在工艺仿真方面具有较大的灵活性。瑞士联邦技术研究开发研制的 SOLIDIS,有较灵活的网格划分,善于进行热变形和热致动的分析。法国微系统公司 memscap 开发研制的 MEMS Pro 为工程设计中普通 MEMS 设计者和 MEMS 专家提供考虑 MEMS 和 IC 混合作用的、在 Windows 操作系统下的设计环境。MEMS Pro 是一个用户化的易于使用的平台,还可以根据某个厂家的制造工艺进行工艺处理定义。此外还有密歇根大学的 CAEMEMS。但是现在的 MEMSCAD 在计算速度、建模和应用范围方面都还存在着缺陷。我国目前主要使用 H-Spice 等 IC 设计软件及 ANSYS 等结构分析软件,还没有专门的用于 MEMS 计算机辅助设计的软件。

## 2 能量场耦合模拟

自 20 世纪 80 年代后期,准静态硅微马达出现以来,也刺激了多能量场耦合分析的发展,尤其是静电驱动分析的发展,它把结构的电容也作为转子位置的一个函数。Shi<sup>[6]</sup>把联合的 BEM/FEM 法用到静电驱动仿真分析中。近来,人们又把兴趣放在了发展 MEMS 设计的 CAD 系统上。Senturia<sup>[1]</sup>发展了一种系统程序 MEMCAD,它用商品化的有限元软件 ABAQUS 进行力学分析,而用以边界元法为基础的程序 FASTCAP 进行静电场分析。

在 MEMS 设计中遇到的最大挑战是多个能量场的耦合分析。在进行仿真时,不仅要针对各种场的特点,寻找相应的算法,还要解决不同场的耦合问题。多种能量场耦合问题仿真按照其动态性质可以分为准静态耦合场问题仿真和动力学耦合场问题仿真。对于包含  $m$  个准静态耦合场的问题,描述其状态行为可以通过含有  $m$  个变矢量的非线性方程组来实现。通常,解上述准静态耦合场问题有两种算法:通用算法和专用算法。通用算法主要是使用松弛迭代法以及添加了辅助算法的牛顿迭代法。通用算法是通过单一能量场求解器实现的。在多能量场耦合问题仿真中,使用单一能量场求解器能把一个复杂问题仿真分成几个简单的问题。这样一来,如果我们使用一系列单一能量场求解器,就能求解复杂的多能量场耦合问题<sup>[2]</sup>。

松弛迭代法的主要步骤是依次求解每一个单一

能量场,然后把求得的结果和其它已知数据一起代入下一个求解器,直到收敛至许可精度内。这种方法的特点是非常方便,并且能最大限度地使用商品化的 CAD 系统,它把许多单一能量场求解器连接在一起。但是,松弛法在某些时候,如计算强耦合问题时,有可能发生不收敛。近年来,又出现了几种基于牛顿法的迭代方案,用于求解多能量场耦合问题。它们允许使用单一能量场求解器,如用于求解电容传感器或静电驱动器的表面牛顿法。另外,还有随着多级牛顿法<sup>[13]</sup>的出现,更加保证了多能量场耦合问题的求解,并且其收敛性质也很好。

专用算法主要是直接使用牛顿迭代法。牛顿法的主要步骤是一次性求解所有  $m$  个非线性耦合方程,然后修正所获得的结果,再进行循环迭代,直到收敛至许可精度内。牛顿法的特点是收敛速度很快,然而牛顿法需要 Jacobi 矩阵的信息,但一般不能通过商品化的软件来获得方程组的 Jacobi 矩阵。因此如果不编写程序,就不能使用牛顿法求解多能量场耦合问题。并且对于特定的问题必须编写特定的算法。尽管如此,牛顿法仍有很大的用武之地,一些特殊的高效的牛顿法求解器被发展并用于 MEMS 的多能量场耦合仿真中<sup>[13~17]</sup>。

在动力学方面,目前关于微结构的精密动力学分析还没有开展,只能粗略地描述。微机械动力学在原有的机械学理论框架的基础上运用微观的分子或原子理论研究构件刚度、阻尼及系统动力学特性与分子或原子种类、构型等之间的内在关系。当描述微机构的动力学时,不同尺寸的微结构分别遵守不同的规律<sup>[11~12]</sup>。对于宏观微机械( $\geq 1\mu\text{m}$ ),可以用传统牛顿第二定律来描述其动力学行为。当分析细观微系统( $10\text{nm} \sim 1\mu\text{m}$ )的动态行为时,需使用 Langevin 方程(包括扩展的 Langevin 方程)来考虑布朗运动的影响。对纳观微系统( $< 10\text{nm}$ )需要量子力学来描述。对于宏观力学,牛顿定律是建立力学模型的基础。由于特征长度微小化产生的尺度效应,微系统中惯性的作用变得相对较弱,特别是纳观微系统,牛顿力学将失去作用,而被量子力学取代。但对微米级和毫米级的微系统,牛顿理论仍是建立动力学模型的依据。

动力学耦合场仿真问题需要计算时间场内的耦合偏微分方程。例如,位于地面上方的受静电力作用的悬臂梁。这个耦合问题包括四个能量场:悬臂梁的弹性变形,平行板电容器间的电容,悬臂梁的动能,以及悬臂梁下的空气对梁的阻尼作用。动力学耦合场仿真问题通常都是使用松弛法,但也有的使用牛顿法。我们可以通过把动力学形式的方程化成准静态形式,如对力能量场中的结构动力学使用 Newmark 法,然后再利用上述的松弛法进行求解计

算,如修正的 Newmark 法。

MEMS 装置一般含有多场耦合,这些装置的函数特性通常只能用非线性偏微分方程描述。建立考虑多场耦合、电路等一体的系统级模型相当困难。直接基于场分析方法对系统进行大规模数值计算,虽然精度较高,但计算费用相当大,同时也不利于 MEMS 设计、制造人员的接受和使用。人们更倾向于在不显著降低精度的前提下,对耦合场进行简化,建立一种能够包含原系统偏微分方程中信息的宏观模型(缩聚模型)。这种简化方案对于 MEMS 是可行的,因为 MEMS 的分析和设计并不刻意追求系统局部的特征,相反却非常重视系统的总体性能、输入-输出特性。如何建立较为合理的缩聚模型,目前在国际上倍受关注,是 MEMS 仿真领域的热点之一<sup>[14~22]</sup>。

建立系统的简化模型是 MEMS 系统级仿真的关键。如何建立系统的简化模型目前尚无统一方法,主要有节点分析法(NODES)和黑箱模型(Black box)<sup>[18]</sup>。NODES 方法是受到电路分析技术的启发而产生的。其基本思想是将系统看成是由多个同一能量域或不同能量域的基本单元组成的,每个单元为一个节点,相当于电路中基本元件如电阻、电容等,运用模拟硬件描述语言 AHDL,将上述节点与真实电路连接在一起形成网络,建立系统的微分方程,应用 SABER 或 SPICE 进行系统仿真。

黑箱模型的基本思想是对 MEMS 耦合场进行不同的能量域分析,选择少数几个参数来描述系统的能量,降低系统的自由度,不计较系统的局部结构及特性,这样系统的耦合场被转化为由几个参数描述的黑箱,将黑箱插入 MEMS 的电路中,应用电路分析软件加以分析,可以大幅度减少系统模拟时间。

NODAS 方法主要针对微致动器、传感器而研究开发的,采用集中参数描述,对于复杂机电系统难以胜任。黑箱模型是在对系统耦合场进行多次数值分析的基础上,对原系统的抽象。只要合理的构造变形状态的完备集、系统的能量表达式,可以获得很高的计算精度,但模型中无法考虑系统的局部特征,不能显式地表示各元件的结构尺寸对系统性能的影响,不便于设计,且计算量很大。建立基于宏观模型和神经网络的微系统动力学快速仿真方法,为 MEMS 器件优化设计提供理论依据。

随着微系统功能的集成日益增强,各种能量域,包括热、流体、电磁、机械等的相互作用,使 MEMS 的仿真与建模越来越复杂。MEMS 多数属于多场耦合动力学问题,虽然可以用 FEM/BEM 耦合方法进行微系统的动态仿真,但由于自由度过多,以及该方法本身的特点,在计算时间上是不现实的。在实际设计 MEMS 器件时往往只对几个参数感兴趣,这就

要求尽量减少系统的自由度,建立解析模型。

首先确定满足边界条件的各阶振型函数作为基函数,建立系统动态响应的表达式;其次写出不同物理场的能量表达式,如动能、应变能、电磁能、热能及能量耗散等,利用多自由度拉格朗日动力学方程,以  $q_i(t)$  为广义坐标,建立多场耦合微机电系统的缩聚模型<sup>[20]</sup>。

尽管在构造基函数时需要花费一定时间进行有限元模拟,一旦由此建立了适当阶数的宏观模型,就可以在有一定范围的不同输入、不同物理和几何参数下,获得较高的动力学模拟精度和速度。这种多场耦合动力学宏观模型对于搜索微系统的设计空间,加快其动力学设计和优化过程极具潜力。

### 3 主要问题及展望

目前耦合场问题仿真所使用的数值方法大多数以牛顿法和松弛法为基础。因为 MEMS 几何结构复杂,多场耦合,并且本身又是一个三维问题,因此在计算中不仅要进行结构内部的量化分析,还要进行结构外部的各种场的耦合分析,这些分析的计算量极大,不仅耗时长,而且要求有较大的内存。因此,发展快速有效的算法是设计实用的 CAD 系统的关键。MEMS CAD 中的数学建模和计算方案不仅应注重 3-D 结构的耦合分析,并要保证仿真算法的稳定性、有效性和通用性。目前的求解多个能量场耦合问题的数值方法不能全部满足稳定性、有效性和通用性这三个要求,因此,有必要研究新的数值方法和计算方案。使用已存在的单一能量场求解器来构造新算法这一点是非常重要的,因为在实际应用中许多 MEMS 包含有两个以上的能量场,并且各个能量场的仿真机理都不尽相同。每一个单一能量场求解器都是稳定的、有效的,这对于耦合问题的最终结果的稳定和高效有很大意义。

前面所描述的求解多个能量场耦合问题大都是静电-力耦合问题。这与静电驱动是目前最流行的 MEMS 驱动方式有关。但是能求解任意多个能量场耦合问题的通用算法目前还仅仅处于理论上可行的阶段,因此还需要在实践中加以验证。另外,由于直接使用牛顿法的专用算法,其收敛速度很快,稳定性也很好,因此对于经常接触同一类问题的人来说,编制特定的专用算法也是很划算的。并且无论是通用算法还是专用算法,都可直接应用于智能材料和结构的分析中。由于计算规模、实验手段等条件的限制,目前一些仿真研究还没有和实验进行充分的对照。因此,有必要加强对仿真结果的实验验证工作,从而拓宽 MEMS 仿真的应用范围。

可以预见, MEMS 数值仿真方法研究将有利促进 MEMCAD 技术的发展,从而将会为整个微电子

机械系统产业带来巨大的推动力.

### 参 考 文 献

- 1 Stephen SD. CAD challenges for microsensors, microactuators, and Microsystems. *Proc IEEE*, 1998, 86(8): 1611~1626
- 2 林胜勇. MEMS 中多能量场耦合问题数值方法研究[硕士论文]. 西安:西北工业大学, 2001(Lin Shengyong. The simulation analysis of coupled multi-energy domain for microelectromechanical systems [MSC Thesis]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2001 (in Chinese))
- 3 戎华,等. 系统级模拟的 MEMS 器件宏模型. 真空科学与技术, 2002, 22(5): 366~371 (Rong Hua, et al. Macromodels for system level simulation of MEMS devices. *Vacuum Science and Technology*, 2002, 22(5): 366~371(in Chinese))
- 4 季国顺,等. 微机械系统建模与仿真技术研究. 光学精密工程, 2002, 10(6): 626~631(Ji Guoshun, et al. Study of the technology of modeling and simulation of MEMS. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(6): 626~631 (in Chinese))
- 5 Beerschwinger U, et al. Coupled electrostatic and mechanical FEA of a micrometer. *J Microelectromechanical Systems*, 1994, 3(4):162~171
- 6 Aluru NR, White J. An efficient numerical technical for electromechanical simulation of complicated microelectromechanical structures. *Sensors and Actuators A*, 1997, 58(1):1~11
- 7 Kaltenbacher M, et al. A finite-element/boundary-element method for the simulation of coupled electrostatic-mechanical systems. *J Phys*, 1997, 7:1975~1982
- 8 Shi F, et al. Dynamic analysis of micro-electro-mechanical systems. *Inter J Numer Methods Eng*, 1996, 39: 4119~4139
- 9 Mukherjee T, et al. Emerging simulation approaches for micromachined devices. *Transactions on Computer-aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2000, 19(12): 1572~1589
- 10 高行山,等. 加速松弛法及其在静电-力耦合问题仿真分析中的应用. 机械强度, 2001, 23(4): 500~502 (Gao hangshan, et al. Accelerated relaxation algorithm for the simulation of coupled electrostatic-mechanical systems. *J Mechanical Strength*, 2001, 23(4): 500~502 (in Chinese))
- 11 赵亚溥. 智能微系统力学中的几个问题. 石家庄铁道学院学报, 1999, 12(2): 13~18 (Zhao Yapu. Some problems in mechanics of intelligent Microsystems. *J Shijiazhuang Railway Institute*, 1999, 12(2): 13~18 (in Chinese))
- 12 傅卫平,等. 微系统动力学中的若干非线性问题. 力学进展, 2002, 32(1): 17~25 (Fu Weiping, et al. Some nonlinear problems in Microsystems dynamics. *Advances in Mechanics*, 2002, 32(1): 17~25 (in Chinese))
- 13 Aluru NR, White J. A multilevel Newton method for mixed-energy domain simulation of MEMS. *J Microelectromechanical Systems*, 1999, 8(3):299~307
- 14 Affour B, et al. Efficient Reduced Order Modeling for System Simulation of Micro Mechanical Systems (MEMS) from FEM Models. *Proc SPIE*, 2000, 4019: 50~54
- 15 霍德鸿,等. 微型机电系统的建模与仿真研究. 机械设计, 2002, (10): 1~4 (Huo Dehong, et al. Study on modeling and simulation MEMS. *Mechanical Design*, 2002, (10): 1~4 (in Chinese))
- 16 王丛舜,等. 微电子机械系统中典型构件的力电耦合分析及其应用研究. 机械强度, 2001, 23(4): 503~506 (Wang Congshun, et al. Research on coupled electro-mechanical analysis and application for typical components in MEMS. *J Mechanical Strength*, 2001, 23(4): 503~506 (in Chinese))
- 17 孙克豪,等. MEMS 器件的计算机辅助设计与模拟. 机械强度, 2001, 23(4): 488~494 (Sun Kehao, et al. Computer-aided design and simulation for MEMS devices. *J Mechanical Strength*, 2001, 23(4): 488~494 (in Chinese))
- 18 孙道恒. MEMS 耦合场分析与系统级仿真. 中国机械工程, 2002, 13(9): 735~768 (Sun Daoheng. Coupled field analysis and system level simulation on MEMS. *China Mechanical Engineering*, 2002, 13(9): 735~768 (in Chinese))
- 19 Hung ES, Senturia SD. Generating efficient dynamical models for microelectromechanical systems from a few finite element simulation runs. *J Microelectromechanical Systems*, 1999, 8(3):280~289
- 20 Gabbay LD. Computer-aided macromodeling for MEMS [Doctor thesis]. Cambridge: Massachusetts Inst Technol, 1998
- 21 Lin WZ, et al. A model reduction method for the dynamic analysis of microelectromechanical systems. *Int J Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2001, 2(2): 89~100
- 22 Liang YC, et al. A neural-network-based method of model reduction for the dynamic simulation of MEMS. *J Micromechanics and Microengineering*, 2001, 11(3): 226~233

## ON THE SIMULATION ANALYSIS OF MIXED-ENERGY DOMAIN FOR MEMS

Gao Hangshan<sup>1,2</sup> Zhao Yapu<sup>2</sup> Lu Shengli<sup>1</sup> Deng Zichen<sup>1</sup>

(1. *Department of Engineering Mechanics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China*)

(2. *LNM, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

**Abstract** It is very important to develop numerical simulation methods in the research and design of micro-electro-mechanical systems. This paper reviewed the present numerical methods for the multiple energy-domain coupling simulation in MEMS. The status quo and the future research trends of this field were discussed.

**Keywords** MEMS, mixed-energy domain, numerical simulation

---

Received 11 January 2004.

- The project supported by Open Foundation of LNM(2003002).